

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Univerzitní studijní programy

**Řídicí a regulační procesy pro tvorbu směsi moderních
zážehových spalovacích motorů**

**The Control and Regulatory Processes for the Mixture
Production of Modern Petrol Engines**

Student:

Ondřej Wolf

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Šimoník, Ph.D.

Ostrava 2014

Zadání bakalářské práce

Student: **Ondřej Wolf**
Studijní program: B3943 Mechatronika
Studijní obor: 3906R007 Automobilová elektronika
Téma: **Řídicí a regulační procesy pro tvorbu směsi moderních zážehových spalovacích motorů**
The Control and Regulatory Processes for the Mixture Production of Modern Petrol Engines

Zásady pro vypracování:

1. Teoreticky rozeberte systém tvorby a podstatu poměru složení palivové směsi zážehového spalovacího motoru. Podrobně se zabývejte řídicími a regulačními procesy pro tvorbu směsi stejného typu motoru.
2. Dle instrukcí vedoucího bakalářské práce, s využitím dynamické válcové zkušebny, detailně ověřte teoretické předpoklady stanovené řešením bodu 1 a proveďte tak analýzu vlastností řízení zážehového motoru.
3. Dle pokynů vedoucího bakalářské práce vypracujte typizovanou laboratorní úlohu z oblasti řešené problematiky.

Seznam doporučené odborné literatury:

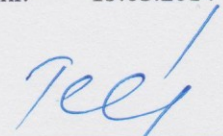
VLK, F.: Elektronické systémy motorových vozidel 1, 2. Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, Brno 2002, ISBN 80-238-7282-6
VLK, F.: Elektrická zařízení motorových vozidel. Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, Brno 2005, ISBN 80-239-3718-9
ŠTĚRBA, P.: Elektrotechnika a elektronika automobilů. Computer press, Praha, 2004
ERJAVEC, J.: Automotive Technology: A Systems Approach, 4th Edition, USA 2004, Thomson Learning, 1401 str., ISBN 1-4018-4831-1
RIBBENS, B., W.: Understanding Automotive Electronics, Sixth Edition, USA 2003, Elsevier Science, 480 str., ISBN 0-7506-7599-3
BOSCH technické brožury, žluté sešity 1996-2013

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Šimoník, Ph.D.**

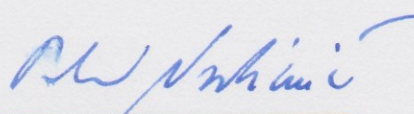
Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



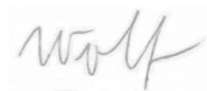


prof. Ing. Petr Noskovič, CSc.
prorektor pro studium

Místopřísežné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Šimoníka, Ph.D. a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 19.5.2014



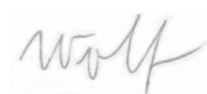
.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne: 19.5.2014



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Ondřej Wolf

Adresa trvalého pobytu autora práce: M. Kopeckého 556/2 Ostrava-Poruba 70800

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Šimoníkovi, Ph.D. za jeho cenné rady a čas věnovaný při vypracování této práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou řízení a regulací tvorby směsi pro zážehové spalovací motory. Úvodní část práce se zaměřuje na určení množství vzduchu a paliva proudícího do spalovacího prostoru. Následující část se zaměřuje na vznik směsi a způsoby řízení směsi a vliv složení směsi na točivý moment. Poslední teoretická část se zabývá fázemi řízení motorů. V praktické části je ověřeno řízení a regulace spalovacích motorů.

Klíčová slova

Lambda regulace, tvorba směsi, řízení a regulace směsi, kvantitativní řízení, zážehové motory.

Abstract

This bachelor thesis concerns with the analyse controlling and regulating of the mixture production of petrol engine. Introduction is focused on determining amount of the air and the fuel flowing to the combustion space. Next part is focused on the creation of mixture and ways of controlling the mixture and influence of the structure of mixture on the torque. The last theoretical part concerns the phases of controlling engine. In practical part, there is the verification of controlling and regulation of the combustion engine.

Key words

Lambda regulation, creation mixture, controlling and regulating mixture, quantitative controlling, petrol engine.

Seznam symbolů a značek

C_L	korekční součinitel
I	integrální část korekčního součinitele
i	počet cyklů.
m_p	hmotnost paliva
m_v	hmotnost vzduchu
n	otáčky motoru
P	proporcionální část korekčního součinitele
p_{p1}	tlak paliva v palivovém potrubí, popřípadě v railu
p_{p2}	tlak vzduchu v sacím potrubí, popřípadě spalovacím prostoru
$p_{pč}$	tlakový spád na palivovém čerpadle
p_{sk}	tlakový spád na škrticí klapce
p_{tk}	tlak testovací kapaliny nastavený na přístroji,
p_{v1}	tlak nasávaného vzduchu před škrticí klapkou
p_{v2}	tlak nasávaného vzduchu za škrticí klapkou
p_{v3}	tlak nasávaného vzduchu ve spalovacím prostoru
p_{vv}	tlakový spád na vstřikovacím ventilu
Q_m	hmotnostní tok
Q_{mp}	hmotnostní tok paliva
Q_{mv}	hmotnostní tok vzduchu
r	měrná plynová konstanta
T_m	teplota motoru (od snímače teploty chladicí kapaliny)
t_{sv}	doba otevření sacích ventilů
t_{vv}	doba otevření vstřikovacího ventilu

$t_{vv\lambda}$	doba otevření vstřikovacího ventilu korigovaná lambda sondou
v_{p1}	rychlost paliva protékajícího vstřikovacím ventilem
v_{p2}	rychlost paliva ve spalovacím prostoru
v_{tk}	rychlost proudění testovací kapaliny,
V_v	Objem spalovacího prostoru
v_{v1}	rychlost nasávaného vzduchu před škrticí klapkou
v_{v2}	rychlost nasávaného vzduchu za škrticí klapkou
v_{v3}	rychlost nasávaného vzduchu ve spalovacím prostoru
α	směšovací poměr
α_C	konstanta korekčního součinitele
β_C	konstanta korekčního součinitele
η_{sv}	účinnost plnění
λ	součinitel přebytku vzduchu
ρ_p	hustota paliva
ρ_{tk}	hustota testovací kapalina dána výrobcem.
ρ_{v1}	hustota nasávaného vzduchu před škrticí klapkou
ρ_{v2}	hustota nasávaného vzduchu za škrticí klapkou
ρ_{v3}	hustota nasávaného vzduchu ve spalovacím prostoru
φ	úhel otevření sacích ventilů

Seznam zkratek

ŘJ	elektronická řídicí jednotka motoru
PM	palivová mapa
ROM	paměť, ze které je možno pouze číst (Read Only Memory)

Obsah

1.	Úvod.....	11
2.	Historie řízení zážehových spalovacích motorů	11
3.	Princip vzniku směsi zážehových spalovacích motorů.....	12
3.1	Výpočet hmotnostního toku vzduchu.....	13
3.2	Výpočet hmotnostního toku vstřikovaného paliva.....	15
3.3	Teoretické regulační procesy směšovacího poměru α	16
3.3.1	Regulace směšovacího poměru α	16
4	Vznik točivého momentu a jeho řízení	16
4.1	Kvantitativní řízení.....	17
4.2	Kvalitativní řízení.....	18
4.3	Řízení točivého momentu změnou předstihu zapalování.....	20
5	Elektronické řízení a regulace spalovacího motoru	21
5.1	Startování motoru.....	23
5.2	Zahřívání motoru.....	23
5.3	Řízení v otevřené smyčce.....	23
5.4	Řízení v uzavřené smyčce	24
5.5	Akcelerace.....	26
5.6	Decelerace	27
5.7	Volnoběh	27
6	Měření komponent pro řízení	27
7	Měření startování zážehového motoru.....	30
7.1	Závislost směšovacího poměru na teplotě nasávaného vzduchu	30
7.2	Závislost směšovacího poměru na teplotě chladicí kapaliny	32
8	Měření kvantitativního řízení.....	35
9	Měření regulace součinitele přebytku vzduchu λ	40
10	Závěr	45
11	Seznam použité literatury a zdrojů	46

12	Seznam příloh	47
----	---------------------	----

1. Úvod

Příprava směsi pro spalovací motory je úkol stejně starý jako spalovací motory samotné. Správná příprava směsi ovlivňuje jak průběh hoření, tak využití energie, která je v palivu uložena. Z toho vyplývá, že řízení a regulace přímo ovlivňuje točivý moment motorů, tím jeho výkon a v neposlední řadě spotřebu paliva, která má velký vliv na ekonomiku i ekologii provozu vozidla jako takového.

Zážehové spalovací motory využívají konstantní poměr paliva a vzduchu. Jedná se o takzvané řízení kvantitativní. Pokud dojde k nárůstu hmotnosti vzduchu dodávaného do spalovacího prostoru, musí dojít ke zvýšení dávky paliva.

V dřívějších dobách se pro tvorbu směsi zážehového spalovacího motoru používaly mechanické karburátory, které ovšem neumožňují přesné dodržení směšovacího poměru za všech provozních podmínek. Spalovací motory v automobilech jsou totiž vystaveny rychle se měnícím provozním podmínkám. Jedná se hlavně o neustále se měnící požadavek na točivý moment ať už z důvodu změny rychlosti vozidla, změny vlastností vozovky nebo řazení rychlostních stupňů převodovky. Dále má velký vliv měnící se teplota jak okolního vzduchu tak samotná provozní teplota spalovacího motoru a jeho příslušenství.

S příchodem elektroniky, moderních řídicích jednotek, a snímačů je možno směšovací poměr nastavit mnohem přesněji, hlavně rychleji, přesně podle požadavků řidiče na točivý moment, potažmo výkon spalovacího motoru. Další výhodou mechatronického řízení a regulace je snadná možnost implementovat do vozidla bezpečnostní a komfortní systémy jako je systém proti prokluzu kol nebo tempomat. [6]

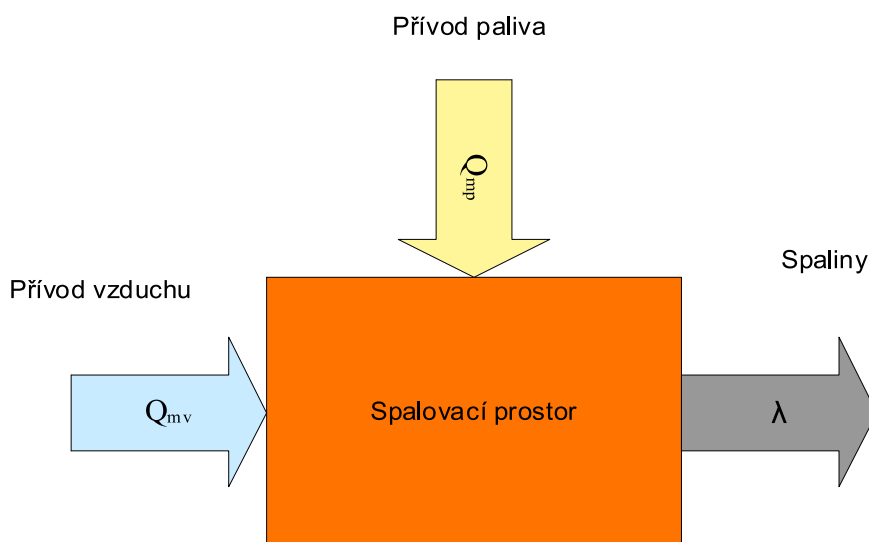
2. Historie řízení zážehových spalovacích motorů

Již od 17. století kdy se objevila myšlenka využití tepelné energie jako zdroje užitečné práce, bylo potřeba objevit a zrealizovat co nejefektivnější využití chemické energie uložené v palivu. Od 19. století, kdy byl jako palivo poprvé využit benzín, se uplatňovaly pouze jednoduché mechanické karburátory. Od poloviny minulého století, kdy došlo k prudkému vývoji elektroniky, byla elektronika nasazena i do automobilového průmyslu. Postupně byly nasazeny elektronické řídicí jednotky do všech automobilů, k řízení všech druhů palivových soustav, od karburátoru až po přímé vstřikování benzínu. [5]

3. Princip vzniku směsi zážehových spalovacích motorů

Jak bylo zmíněno v předchozích kapitolách, cílem řízení je získat ideální poměr palivo-vzduch, tak aby bylo dosaženo co nejefektivnějšího spálení směsi. Palivo je míseno se vzduchem v samotném spalovacím prostoru motoru, nebo v sacím kanálku. Vzduch je přiváděn sacím potrubím a palivo je vstřikováno vstřikovači.

Na obě media může být pohlíženo jako na sloupec tekutiny o určité hmotnosti, přivedené do spalovacího prostoru za určitý čas. Tímto časem může být uvažován jeden cyklus motoru. Toto definuje určitý hmotnostní tok Q_m . Výsledek tohoto mísení dvou tekutin je uvažován jako směšovací poměr označovaný α .



Obr. 1- Blokové schéma tvorby směsi pro spalovací motory

Směšovací poměr α je vypočítán podle vztahu:

$$\alpha = \frac{Q_{mv}}{Q_{mp}} \quad (1)$$

Po úpravě je možno vyjádřit jako:

$$\alpha = \frac{m_v}{m_p}$$

Pokud je poměr vzduchu a paliva roven 14,7 kg vzduchu na 1 kg paliva je $\lambda=1$. Jedná se ale o teoretický poměr, který není během provozu spalovacího motoru trvale zajištěn, ale hodnota součinitele přebytku vzduchu λ se pohybuje kolem hodnoty určené elektronickou řídicí jednotkou motoru. Při $\lambda=1$ dochází ke spálení veškerého paliva i

vzduchu. Pokud je $\lambda > 1$ je při spalování přebytek vzduchu, směs je takzvaně chudá. Pokud je $\lambda < 1$ je při spalování přebytek paliva, směs je takzvaně bohatá.

3.1 Výpočet hmotnostního toku vzduchu

Pro výpočet hmotnostního toku vzduchu je uvažován následující vztah.

$$Q_{mv} = S_{v2} \cdot v_{v2} \cdot \rho_{v2} \quad (2)$$

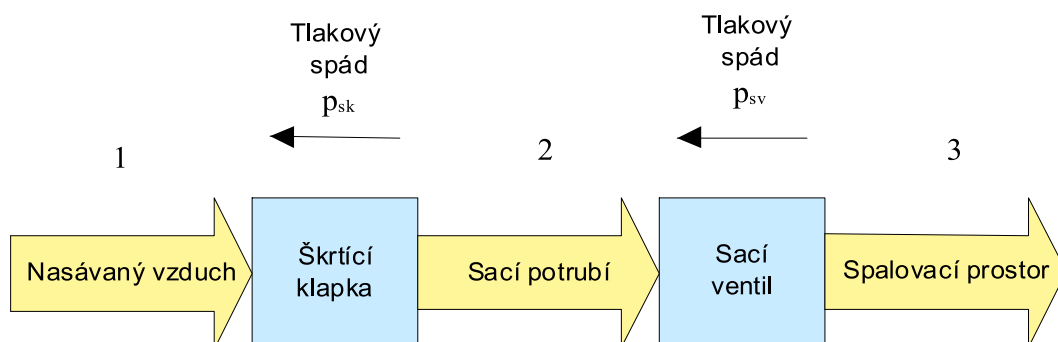
Kde:

S_{v2} ... průměr sacího potrubí,

v_{v2} ... rychlost proudění vzduchu v sacím potrubí,

ρ_{v2} ... hustota vzduchu.

Průměr sacího potrubí S_{v2} je uvažován jako konstanta. Jako proměnná je uvažována rychlost proudění vzduchu a hustota vzduchu. Pro určení proměnných je potřeba rozdělit sací trakt podle Obr. 2.



Obr. 2 - Blokové schéma rozdělení sacího traktu

Rychlost v_{v2} je dána otáčkami motoru n . Podle otáček motoru n a doby otevření sacích ventilů φ je určena doba sání.

$$t_{sv} = \frac{\varphi}{n} \quad (3)$$

Kde:

t_{sv} ... doba otevření sacích ventilů,

φ ... uhel otevření sacích ventilů [rad],

n ... otáčky motoru.

Hmotnostní tok ve spalovacím prostoru během plnění je popsán následujícím vztahem.

$$Q_{mv} = \frac{V_v}{t_{sv}} \cdot \rho_{v3} \quad (4)$$

Kde:

V_v ... Objem spalovacího prostoru,

ρ_{v3} ... hustota nasávaného vzduchu ve spalovacím prostoru.

Protože je hustota nasávaného vzduchu ve spalovacím prostoru ρ_{v3} v praxi neměřitelná, je potřeba ji určit z hustoty nasávaného vzduchu za škrticí klapkou ρ_{v2} .

$$\rho_{v3} = \rho_{v2} \cdot \eta_{sv} \quad (5)$$

Kde:

η_{sv} ... účinnost plnění.

Účinnost plnění η_{sv} přímo souvisí s tlakovým spádem p_{zv} . Pro výpočet rychlosti proudění vzduchu v_{v2} je uvažován následující vztah.

$$v_{v2} = \frac{Q_{mv}}{S_{v2} \cdot \rho_{v2}} \quad (6)$$

Pro výpočet hustoty vzduchu za škrticí klapkou ρ_{v2} je možno využít více způsobů, které jsou závislé na praktické realizaci řízení motoru. Jedním z nich je výpočet pomocí stavové rovnice plynů, která je dána následujícím vztahem.

$$\rho_{v2} = \frac{p_{v2}}{r \cdot T_{v2}} \quad (7)$$

Ten vztah je možno použít v případě, že můžeme měřit teplotu vzduchu za škrticí klapkou. Tlak p_{v2} je možno měřit přímo v sacím potrubí za škrticí klapkou nebo je dán tlakovým spádem na škrticí klapce, a následně vypočítán v závislosti na tlaku před škrticí klapkou který odpovídá atmosférickému tlaku.

$$\rho_{v2} = \frac{p_{v2}}{p_{v1}} \cdot \rho_{v1} \quad (8)$$

Pro další možný výpočet hustoty ρ_{v2} byl použit vztah zohledňující tlakové ztráty na škrticí klapce. Byl zanedbán rozdíl teploty vzduchu před a za škrticí klapkou a dále byla zanedbána závislost tlakové ztráty na rychlosti proudícího vzduchu.

3.2 Výpočet hmotnostního toku vstřikovaného paliva

Pro výpočet hmotnostního toku vstřikovaného paliva jsou uvažovány podobné vztahy jako pro výpočet hmotnostního toku nasávaného vzduchu.

$$Q_{mp} = S_{p1} \cdot v_{p1} \cdot \rho_p \quad (9)$$

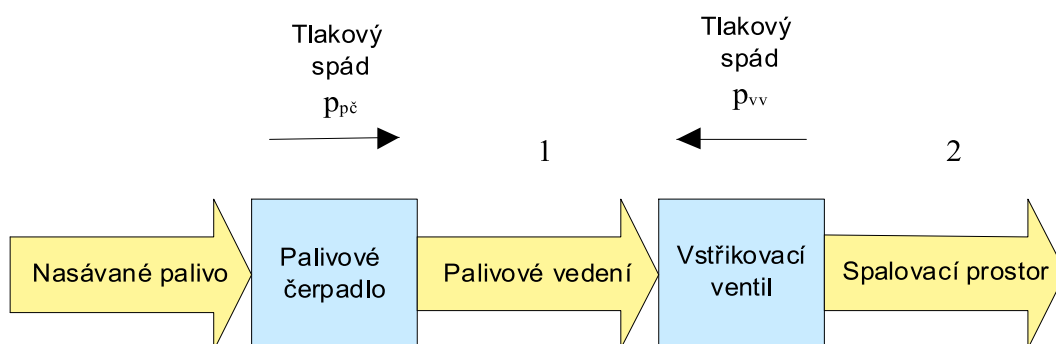
Kde:

S_{p1} ...průtočný průřez vstřikovacího ventilu,

v_{p1} ...rychlost paliva protékajícího vstřikovacím ventilem,

ρ_p ...hustota paliva.

Průtočný průřez vstřikovacího ventilu S_{pp} je uvažován jako konstanta při zanedbání přechodových dějů při otevírání a zavírání ventilu. Hustota paliva ρ_p je také uvažována jako konstanta z důvodu nízké stlačitelnosti kapalin. Proměnná ovlivňující hmotnostní tok vstřikovaného paliva Q_{mp} je rychlost průtoku paliva. Pro výpočet je uvažováno rozdělení palivové soustavy na Obr. 3.



Obr. 3 - Blokové schéma rozdělení palivové soustavy

Pro výpočet rychlosti paliva v_{p1} je využita Bernoulliho rovnice (10).

$$\frac{p_{p1}}{\rho_p} + \frac{v_{p1}^2}{2} + g \cdot h = \frac{p_{p2}}{\rho_p} + \frac{v_{p2}^2}{2} + g \cdot h \quad (10)$$

Součin tíhové zrychlení g a výšky hladiny h může být zanedbán, protože výška hladiny h je velmi malá a součin je tím pádem zanedbatelný oproti ostatním složkám rovnice. Rychlost v_{p2} je rychlost toku paliva ve spalovací komoře. Palivo je ale rozprášeno do několikanásobně většího průřezu než je průtočný průřez ventilu. Z tohoto důvodu byla

uvažována rychlost toku paliva v_{p2} jako nulová. Následně byla rovnice upravena do tvaru (11).

$$v_{p1} = \sqrt{2 \cdot \frac{|p_{p2} - p_{p1}|}{\rho_p}} \quad (11)$$

3.3 Teoretické regulační procesy směšovacího poměru α

Ze vztahu (11) vyplývá, že pro udržení konstantního hmotnostního toku paliva Q_{mp} je potřeba zachovat konstantní rozdíl tlaku p_{p2} a p_{p1} . Tlak p_{p1} je roven buď tlaku p_{v2} v sacím potrubí v případě nepřímého vstřikování paliva anebo je roven kompresnímu tlaku ve spalovacím prostoru p_{v3} v případě přímého vstřikování paliva. Tlak paliva p_{p1} je tvořen palivovým čerpadlem nebo vysokotlakým palivovým čerpadlem v případě přímého vstřikování paliva.

Pro regulaci tlaku paliva p_{p1} se používá regulační ventil na palivovém railu nebo na čerpadle. Popřípadě je možno regulovat tlak paliva p_{p1} samotným průtokem čerpadla.

3.3.1 Regulace směšovacího poměru α

Pokud je uvažován konstantní hmotnostní tok paliva Q_{mp} , je hmotnost dávky paliva vstříknuté do spalovacího prostoru během jednoho cyklu dána dobou, po kterou je otevřen vstřikovací ventil.

$$\Delta m_p = \frac{Q_{mp}}{\Delta t_{vv}} \quad (12)$$

Hmotnost vzduchu dopravena do spalovacího prostoru za jeden pracovní cyklus motoru je dána hmotnostním tokem vzduchu Q_{mv} . Doba otevření sacích ventilů t_{sv} je konstantní.

$$\Delta m_v = \frac{\Delta Q_{mv}}{t_{sv}} \quad (13)$$

Ze vztahu (12) a (13) vyplývá, že regulace směšovacího poměru α je prováděná skrze dobu otevření vstřikovacího ventilu t_{vv} a úhel natočení škrtecí klapky. [1], [2], [3].

4 Vznik točivého momentu a jeho řízení

Točivý moment je vytvářen tlakem hořící směsi ve spalovacím prostoru. Tlak působí na píst a vzniklá síla je přenášena přes pístní čep a ojnici na klikovou hřídel. Točivý moment je vytvářen pokaždé, když síla působí na páku, respektive klikovou hřídel. Délka

páky je jedním z hlavních parametrů, který určuje točivý moment motoru. Délka páky je měřena z osy klikové hřídele do osy ojnicního ložiska, v místě, kde působí síla od motoru prostřednictvím ojnice. Točivý moment je vyjádřen jako součin síly a délky. Jednotka [N.m]. Délka páky na klikové hřídeli, stejně jako průměr pístu a celková velikost spalovacího prostoru jsou konstantní, takže jimi není možno provádět řízení točivého momentu.

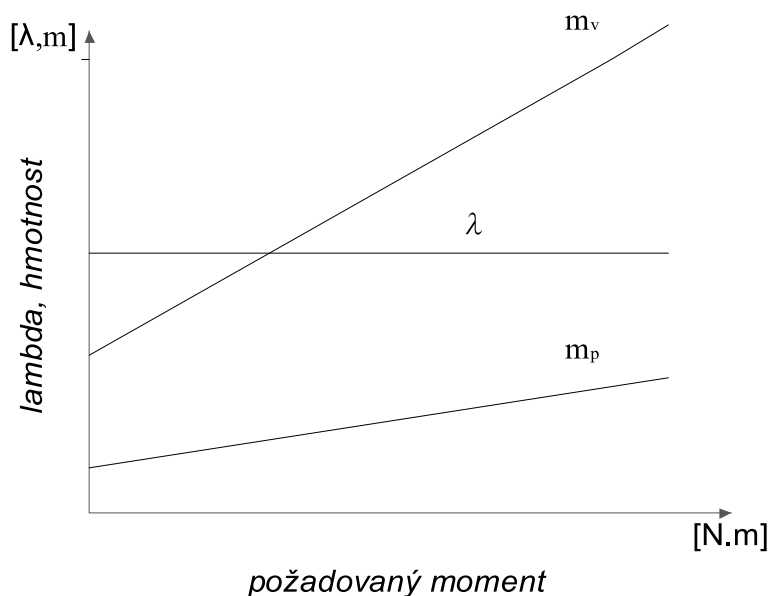
Způsoby řízení točivého momentu zážehového motoru:

- kvantitativním řízením (změnou množství směsi),
- kvalitativním řízením (změnou poměru α),
- změnou předstihu zapalování.

4.1 Kvantitativní řízení

Kvantitativní řízení má u řízení točivého momentu zážehového motoru největší vliv na výsledný točivý moment. Nejvýraznějším znakem tohoto řízení je konstantní, stechiometrický poměr.

Řízení probíhá změnou natočení škrtkové klapky, skrze kterou dojde ke změně hmotnosti vzduchu proudícího do spalovacího prostoru. Změnu hmotnosti vzduchu musí úměrně doprovázet i změna hmotnosti paliva.



Obr. 4 - Závislost součinitele přebytku vzduchu λ na požadovaném točivém momentu

To znamená, že pokud řídicí jednotka motoru vyhodnotí ze snímačů (například snímač natočení škrticí klapky, snímač tlaku v sacím potrubí za škrticí klapkou nebo snímač hmotnostního toku vzduchu) nárůst hmotnosti vzduchu proudícího do spalovacího prostoru, musí zvýšit dobu otevření vstřikovacích ventilů. Řídicí jednotka motoru v tomto případě slouží jako proporcionální regulátor. To znamená, že signál ze vstupu přenáší přímo na výstup, popřípadě ho zesiluje.

Celkové množství směsi poté ovlivňuje energii uvolněnou ve spalovacím prostoru motoru. Větší množství směsi znamená více uvolněné energie a tím pádem větší točivý moment. Naopak menší množství směsi je rovno nižšímu točivému momentu.

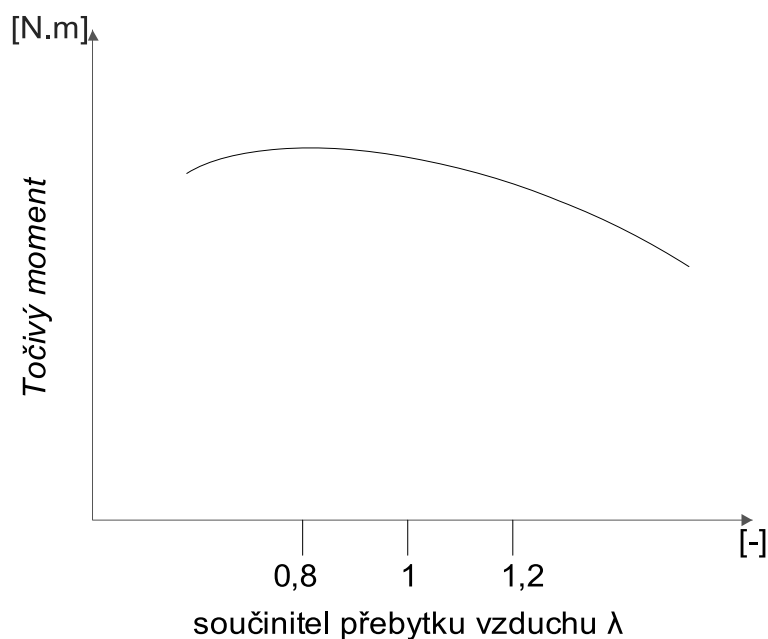
Řídicí jednotka zpracovává informaci o hmotnostním toku vzduchu Q_{mv} , a udává hmotnostní tok paliva Q_{mp} , který může být regulován skutečnou hodnotou λ , pomocí lambda sondy. Lambda sonda pro toto řízení může být pouze dvoubodová. Q_{mv} je proporčně přímo úměrné t_{vv} a to je v případě vhodného řízení tlaku v railu přímo úměrné Q_{mp} . Jak bylo zmíněno výše, elektronická řídicí jednotka slouží jako proporcionální regulátor.

4.2 Kvalitativní řízení

Kvalitativní řízení je nejvýznamnějším druhem řízení pro vznětové motory. Princip kvalitativního řízení spočívá ve změně součinitele přebytku vzduchu λ . Konstantní je zpravidla hmotnostní tok vzduchu Q_{mv} a jediná proměnná je hmotnostní tok paliva Q_{mp} , který je řízen délkou otevření vstřikovacího ventilu t_{vv} .

Vliv součinitele přebytku vzduchu λ na točivý moment motoru je patrný z Obr. 5. Přesná hodnota točivého momentu v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu je závislá na konkrétních parametrech daného motoru.

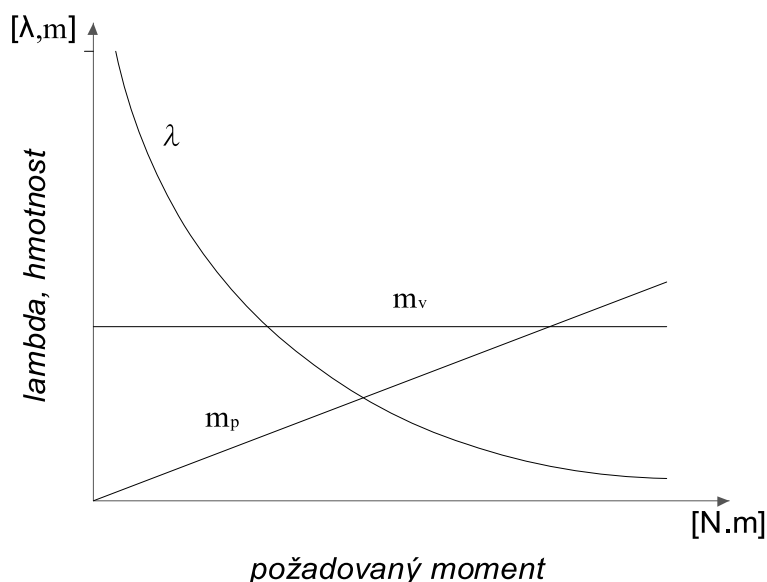
V dnešní době, kdy se rozšiřuje přímé vstřikování paliva u zážehových motorů, je kvalitativní řízení točivého momentu motoru uplatňováno i zde. Jedná se o méně uplatňované řízení, až za řízením kvantitativním.



Obr. 5 - Závislost točivého momentu na součiniteli přebytku vzduchu λ

Využití je především v těch pracovních oblastech motoru, kdy je požadavek na velmi vysoký točivý moment, například při akceleraci nebo během zahřívání motoru na provozní teplotu. Obohacením směsi kdy $\lambda < 1$ je získáno více energie z paliva, bohužel na úkor měrné spotřeby paliva, která stoupá. V případě nízkého zatížení může motor pracovat v režimu chudé směsi, kdy je $\lambda > 1$. Dochází k poklesu točivého momentu, ale díky menší dávce paliva a jeho efektivnějšímu spalování dochází ke snížení měrné spotřeby paliva.

Základním chemickým principem je hoření uhlovodíků HC, které v reakci s kyslíkem O_2 tvoří vodní páru H_2O a oxid uhličitý CO_2 . To platí pro ideální hoření a ideální palivo. V praxi se v palivu nachází další sloučeniny a ani spalování není ideální. Velkou nevýhodou při spalování chudé směsi je tvorba NO_x emisí, kvůli kterým je potřeba použít NO_x katalyzátor. Při bohaté směsi vzrůstá tvorba CO. Ideální tvorba emisí se nachází v oblasti kolem stechiometrického poměru.



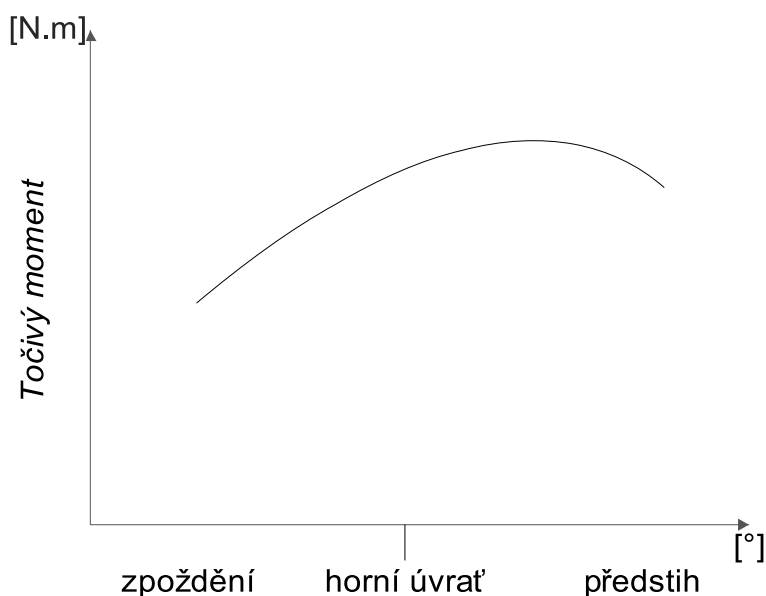
Obr. 6 - Závislost součinitele přebytku vzduchu λ na požadovaném točivém momentu

Kvalitativní řízení je po technické stránce podmíněno vysokotlakými vstřikovacími ventily a upravenými sacími kanálky, písty a spalovacími prostory obecně, aby došlo k víření vzduchu, do kterého je vstříknutá dávka paliva, která je následně stržena proudem vířícího vzduchu a rozprášena do oblasti zapalovací svíčky. Zapálená směs díky tomu bezpečně shoří. Při nepřímém vstřikování paliva, by při ochuzené směsi nemuselo dojít k zapálení této směsi. Tento jev nastává při součiniteli přebytku vzduchu $\lambda > 1,6$.

4.3 Řízení točivého momentu změnou předstihu zapalování

Předstih zapalování je doba před horní úvratí pístu, kdy dojde k přeskočení jiskry na zapalovací svíčke. Předstih je obvykle vyjádřen v počtech stupňů natočení klikové hřídele. Předstih zapalování ovlivňuje hoření směsi ve spalovacím prostoru, má velký vliv na detonační spalování a na emise.

I s ohledem na točivý moment, je nejvýhodnější doba předstihu zapalování před horní úvratí. Pokud by došlo k zapálení směsi v době kdy je píst v horní úvratí, směs by se nestihla zapálit a shořet při nejvyšším kompresním tlaku a nebyla by využita všechna energie paliva. Také by docházelo k detonačnímu spalování a tím pádem ke klepání motoru. Naopak při příliš velkém předstihu výkon opět klesá, protože palivo shoří dřív, než se píst dostane do horní úvratí a začíná motor brzdit.



Obr. 7 - Závislost točivého momentu na předstihu zapalování

Průběh točivého momentu v závislosti na předstihu zapalování při konstantním směšovací poměru a konstantních otáčkách motoru je patrný z Obr. 7. [3], [6].

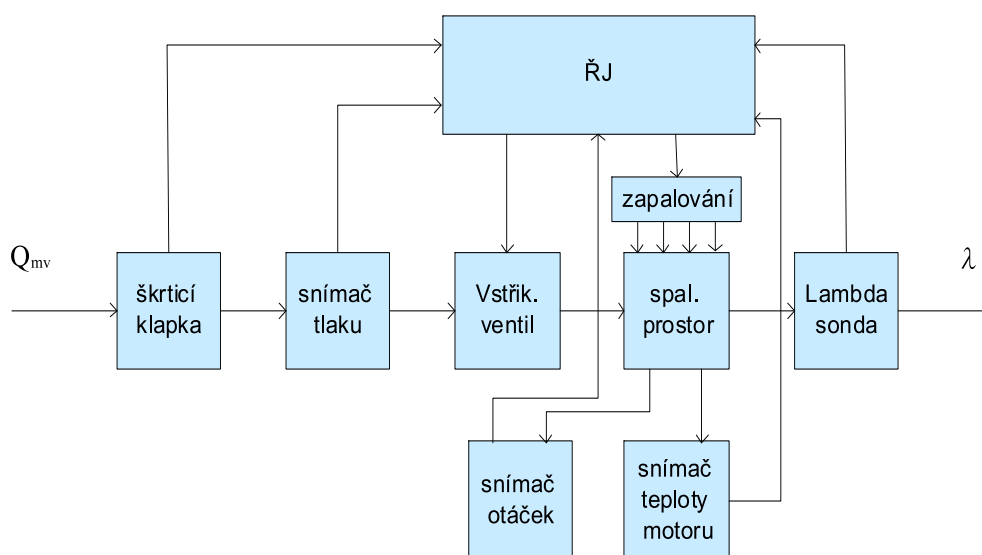
5 Elektronické řízení a regulace spalovacího motoru

Primární funkce elektronického řídicího systému motoru je určení přesné hmotnosti vzduchu proudícího do spalovacího prostoru. Poté řídicí systém přesně reguluje dávku paliva podle nasávaného množství vzduchu, tak aby bylo dosaženo stechiometrického poměru .

Základní komponenty elektronického řízení jsou:

- řídicí jednotka motoru (ŘJ),
- snímač polohy škrticí klapky,
- snímač hmotnosti vzduchu,
- snímač tlaku v sacím potrubí,
- vstřikovací ventily,
- zapalování (zapalovací transformátor a svíčky),
- lambda sonda,
- snímač teploty chladicí kapaliny,
- snímač otáček a polohy klikové hřídele.

Snímač tlaku na Obr. 8 může být nahrazen snímačem hmotnosti vzduchu. Při použití snímače hmotnosti vzduchu je možno získat velmi přesnou hodnotu hmotnosti vzduchu nasávaného do spalovacího prostoru. Pokud je použit pouze snímač tlaku v sacím potrubí, je skutečná hodnota hmotnosti nasávaného vzduchu vypočítána, respektive odhadnuta. Konkrétní hodnoty jsou pro jednotlivé typy vozidel zjišťovány experimentálně.



Obr. 8 - Schéma elektronického řízení spalovacího motoru

Řídicí jednotka na základě zjištěné hmotnosti vzduchu určuje vstřikovanou dávku paliva, která je ještě korigována na základě signálu od ostatních snímačů. Konkrétní hodnoty vstřikované dávky, včetně korekcí, jsou uloženy v takzvané palivové mapě, dále jen PM. PM je uložena na ROM paměti v ŘJ. ŘJ vlastně pouze vyhodnocuje signály z příslušných snímačů, ze kterých vyhodnotí současný stav motoru a podmínky za kterých motor pracuje. Dále už jen přiřadí konkrétní množství vstřikované dávky podle PM.

Snímače a signály, které využívá řídicí jednotka, závisí na konstrukci motoru a na stavech v jakých spalovací motor pracuje. Tyto stavy jsou:

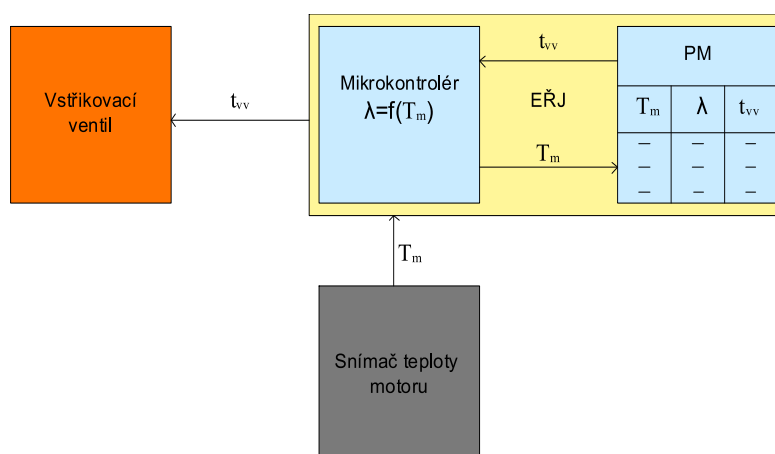
- startování motoru,
- zahřívání motoru,
- řízení v otevřené smyčce,
- řízení v uzavřené smyčce,
- akcelerace,
- decelerace,
- volnoběh.

5.1 Startování motoru

Pro startování motoru je nejdůležitějším ukazatelem teplota motoru a teplota nasávaného vzduchu. Palivo, které je rozprašováno do nasávaného vzduchu při nízkých teplotách, vytváří příliš velké kapky, které obtížně hoří. Proto během startování motoru musí být součinitel přebytku vzduchu $\lambda < 1$. Nejdůležitější snímač během startování je snímač teploty chladicí kapaliny a snímač teploty vzduchu. Na základě signálu z těchto snímačů je volena dávka z PM.

5.2 Zahřívání motoru

Po nastartování motoru přechází ŘJ motoru do stavu zahřívání. Motor pracuje mimo oblast stechiometrického poměru, směs je obohacena. Míra obohacení směsi se odvíjí od teploty motoru, která je v tomto režimu stále jako nejvýznamnější faktor pro tvorbu směsi. Není kladen důraz na úsporu paliva nebo na tvorbu emisí, ale nejdůležitějším požadavkem v tomto režimu je co nejrychlejší zahřátí motoru.



Obr. 9 - Schéma volby směšovacího poměru λ během zahřívání

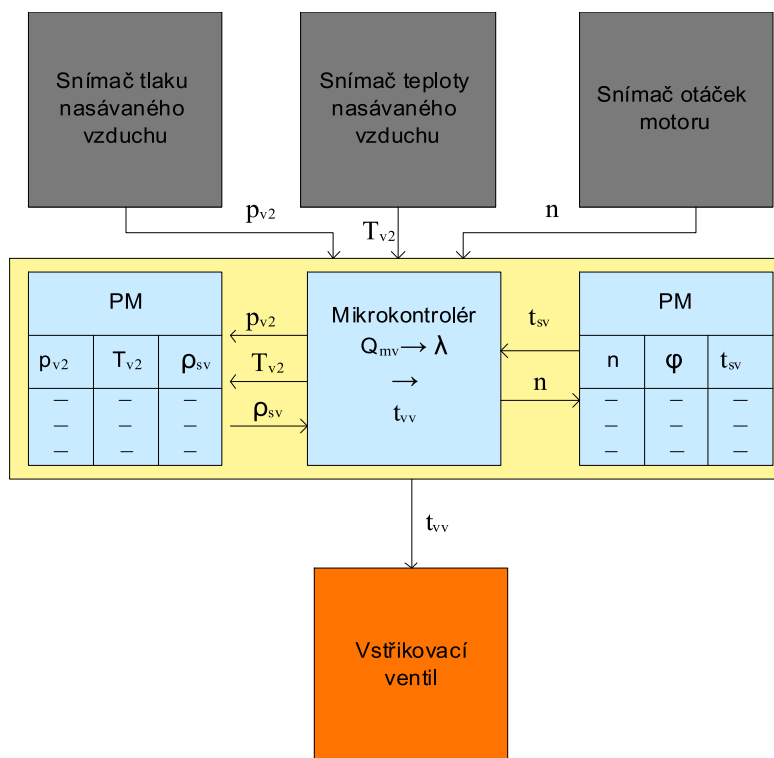
Volba směšovacího poměru závisí na údajích uložených v ROM paměti. Řídicí jednotka na základě teploty motoru T_m vybere z palivové mapy příslušný směšovací poměr, který reguluje délkou doby otevření vstřikovacího ventilu t_{vv} .

Přesná struktura elektronické řídicí jednotky není předmětem této práce. Vnitřní uspořádání elektronické řídicí jednotky závisí na konkrétním výrobci ŘJ.

5.3 Řízení v otevřené smyčce

Po zahřátí motoru se ŘJ přepne do režimu řízení v otevřené smyčce. To ale nastává pouze v případě, pokud není k dispozici signál lambda sondy. Toto nastává v případě, kdy je motor již dostatečně zahřátý, ale signál lambda sondy stále není použitelný. Za každých

okolností se již musí v tomto režimu udržovat stechiometrický směšovací poměr $\alpha=14,7$. Délka pulsu t_{vv} , který otevírá vstřikovací ventil, musí být vypočítána z množství vzduchu, který je nasáván do spalovacího prostoru. Množství vzduchu nasávaného do spalovacího prostoru musí být určeno tak přesně, jak jen to je možné, s ohledem na technické parametry motoru.



Obr. 10 - Schéma volby směšovacího poměru λ během řízení v otevřené smyčce

Výpočet doby otevření ventilů závisí hlavně na množství vzduchu přivedeného do spalovacího prostoru, a dále na korekčních parametrech jako je tlak v místě vstřiku paliva, na teplotě paliva apod. Výpočet je přesně popsán v kapitole 3.

ŘJ na základě signálu od jednotlivých snímačů určí parametry potřebné pro výpočet hmotnostního toku vzduchu Q_{mv} nasávaného do spalovacího prostoru. Podle vstupního signálu určuje parametry uložené v PM na ROM paměti. Podle množství vzduchu dále vypočítá množství paliva, které je potřebné pro udržení stechiometrického poměru. Podle požadovaného množství paliva je určena doba otevření vstřikovacího ventilu t_{vv} .

5.4 Řízení v uzavřené smyčce

Pro řízení v uzavřené smyčce je nejvýznamnější regulace směsi pomocí lambda sondy. Signál lambda sondy reguluje velmi přesně součinitel přebytku vzduchu λ na přesnou hodnotu stechiometrického poměru. Každý fyzikální systém je velmi citlivý na změnu podmínek, za kterých pracuje, například teploty nebo stárnutí a opotřebování komponentů,

což můžeme eliminovat právě lambda sondou, která dává velmi přesnou představu o celkovém chování motoru.

Lambda sonda přímo ovlivňuje délku otevření vstřikovacích ventilů t_{vv} . ŘJ vyhodnocuje signál lambda sondy a plynule přizpůsobuje délku doby otevření vstřikovacích ventilů t_{vv} . Základní výpočet pro dobu otevření ventilu je dán vztahem (14).

$$t_{vv\lambda}(i) = t_{vv}(i) \cdot [1 + C_L(i)] \quad (14)$$

Kde:

$t_{vv\lambda}$...doba otevření vstřikovacího ventilu korigována lambda sondou,

t_{vv} ...doba otevření vstřikovacího ventilu vypočítána z hmotnosti nasávaného vzduchu,

C_L ...korekční součinitel.

Korekční součinitel C_L je během řízení v otevřené smyčce roven 0. Korekční součinitel během řízení v uzavřené smyčce je dán vztahem (15).

$$C_L(i) = \alpha_C \cdot I(i) + \beta_C \cdot P(i) \quad (15)$$

Kde:

I ...integrální část korekčního součinitele,

P ...proporcionální část korekčního součinitele,

α_C, β_C ...konstanty korekčního součinitele.

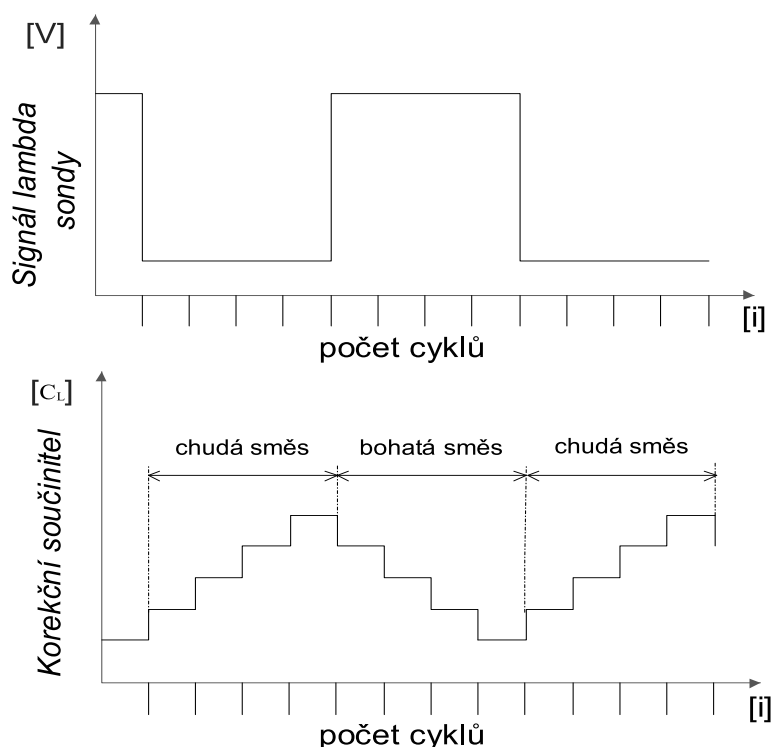
Pokaždé když lambda sonda detekuje bohatou směs (výstupní napětí lambda sondy je vysoké), potom $I(i)$ je sníženo pro další cyklus i . Vyjádřeno vztahem (16).

$$I(i + 1) = I(i) - 1 \quad (16)$$

V případě, že lambda sonda detekuje chudou směs (výstupní napětí lambda sondy je nízké), potom $I(i)$ je zvýšeno pro další cyklus i . Vyjádřeno vztahem (17).

$$I(i + 1) = I(i) + 1 \quad (17)$$

Korekční součinitel C_L je určován v cyklech i řídicí jednotkou. Délka cyklu n je nastavená tak aby ŘJ korigovala dobu vstřiku t_{vv} a tím dostatečně rychle regulovala výsledný součinitel přebytku vzduchu λ .



Obr. 11 - Průběh korekčního součinitele C_L

Proporcionální část korekčního součinitele $P(i)$ je odchylka od průměrné, neboli střední hodnoty signálu lambda sondy. Tato hodnota odpovídá stechiometrickému poměru. Proporcionální část společně s integrální částí korekčního součinitele se snaží během každého cyklu upravit vstřikovanou dávku paliva tak, aby spalovaná směs byla ve stechiometrickém poměru.

5.5 Akcelerace

Během vysoké zátěže motoru nebo prudké akcelerace ŘJ přizpůsobuje množství paliva a tím zvyšuje směšovací poměr λ . To znamená, že během akcelerace motor pracuje s bohatou směsí pro maximalizaci točivého výkonu, tak jak je znázorněno na Obr. 5.

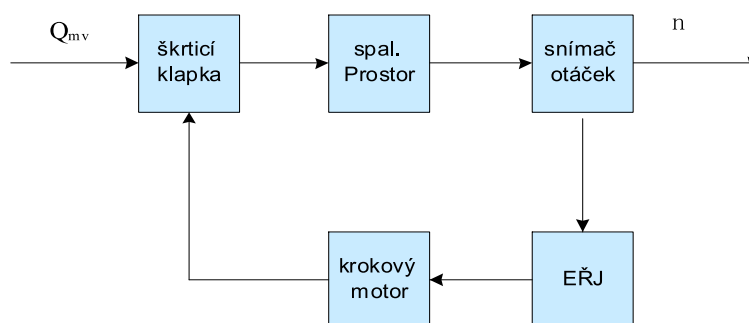
ŘJ rozpozná stav akcelerace podle úhlu natočení škrticí klapky a otáček motoru. Pokud ŘJ rozpozná stav akcelerace, pro výpočet dávky paliva nepoužívá signál lambda sondy. Během akcelerace je součinitel přebytku vzduchu roven přibližně $\lambda=0,8$.

5.6 Decelerace

Během decelerace, kdy je zatížení motoru velmi malé a motor má vysoké otáčky, pracuje ŘJ s velmi chudou směsí, popřípadě dojde k zastavení vstřikování paliva. Díky tomu může být redukována spotřeba paliva a tím pádem i emise. Nízká zátěž je rozeznána podle polohy škrticí klapky a otáček motoru. Motor pracuje bez přívodu paliva pouze ve vysokých otáčkách. Pokud dojde k poklesu otáček na úroveň 1500-2000 ot/min, ŘJ začne vyrovnávat otáčky opětovným spuštěním vstřikování paliva.

5.7 Volnoběh

Během řízení volnoběhu řidič neovládá škrticí klapku a otáčky motoru jsou samočinně řízeny. Otáčky jsou udržovány co nejmenší tak, aby motor stále pracoval a byla zajištěna funkce alternátoru, kompresoru klimatizace apod.



Obr. 12 - Schéma řízení volnoběhu

Řízení volnoběhu může být realizováno obtokovým kanálkem, který pouští vzduch mimo škrticí klapku do sacího potrubí. Další způsob řízení je využití krokového motoru pro ovládání polohy škrticí klapky. Během tohoto stavu se vstřikovaná dávka nevypočítává ze signálu lambda sondy, nýbrž pouze z otáček motoru. [3], [4].

6 Měření komponent pro řízení

Součástí bakalářské práce je ověření a analýza řízení na konkrétním vozidle. Protože diagnostické systémy, jako je například BOSCH KTS, neumí snímat všechny veličiny a konkrétní hodnoty veličin, bylo potřeba určit některé parametry motoru experimentálně.



Obr. 13 - Měření průtoku vstřikovacích ventilů Hyundai

Na testovaném vozidle Hyundai i30 nebylo možno vyčíst dávku paliva, která připadala na jeden vstřík. K dispozici byla pouze informace o tlaku paliva ve vstřikovacím railu p_{pl} a o době otevření vstřikovacích ventilů t_{vv} . S ohledem na výpočet průtoku bylo potřeba zjistit průřez vstřikovacích ventilů. Měření probíhalo na stroji MASTERMATE EVOLUTION.

Přístroj umožňoval otevření vstřikovacích ventilů na dobu 15 s a tlak, pod kterým byla vstřikovaná testovací kapalina, byl nastaven na 3,5 bar (relativní tlak).

Měření probíhalo při teplotě, při které jsou přesně definovány parametry testovací kapaliny, zvláště její hustota.

Rychlost proudění kapaliny je dána vztahem (18).

$$v_{tk} = \sqrt{2 \cdot \frac{p_{tk}}{\rho_{tk}}} \quad (18)$$

$$v_{tk} = \sqrt{2 \cdot \frac{350000}{750}}$$

$$v_{tk} = 30,5505 \text{ [m/s]}$$

Kde:

v_{tk} ... rychlost proudění testovací kapaliny,

p_{tk} ... tlak testovací kapaliny nastavený na přístroji,

ρ_{tk} ... hustota testovací kapalina dána výrobcem.

Provedeno bylo 6 měření, při kterých byl měřen objem kapaliny, která protékla přes vstřikovače za dobu 15 s.

V₁ [ml]	65,8	V₄ [ml]	63,3
V₂ [ml]	65,4	V₅ [ml]	61,4
V₃ [ml]	63,5	V₆ [ml]	60,6

Tabulka 1- Objemy testovací kapaliny, která protékla vstřikovačem za dobu 15 s

Průměrná dávka vypočtena ze všech měření je 0,00006333 m³. Ze vztahu (19) byl vypočítán průřez vstřikovače.

$$Q_v = S_{p1} \cdot v_{tk} \quad (19)$$

$$S_{p1} = \frac{Q_v}{v_{tk}}$$

$$S_{p1} = \frac{V}{v_{tk} \cdot t}$$

Po dosazení:

$$S_{p1} = \frac{0,00006333}{30,5505 \cdot 15}$$

$$S_{p1} = 0,0000001382 \text{ [m}^2\text{]}$$

7 Měření startování zážehového motoru

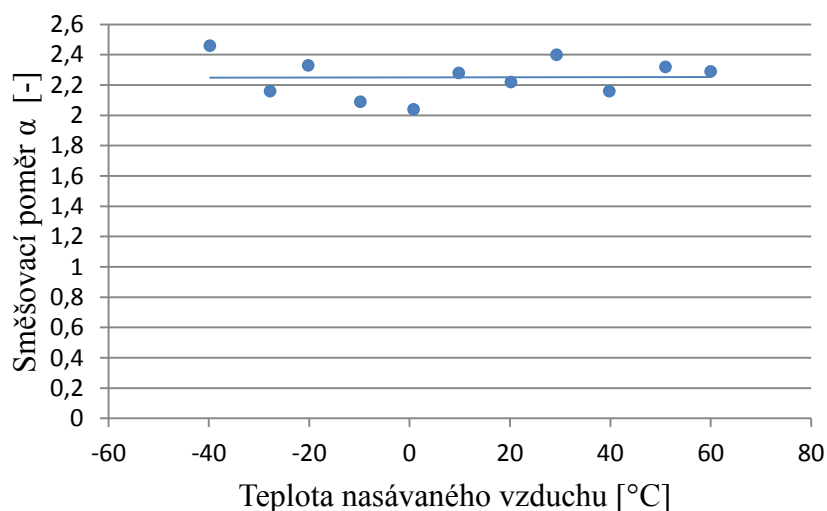
Měření probíhala na vozidle Hyundai i30 1.6 GD (88 kW), označení motoru G4FD. Vozidlo je vybaveno nepřímým vstřikováním benzínu MPI.

7.1 Závislost směšovacího poměru na teplotě nasávaného vzduchu

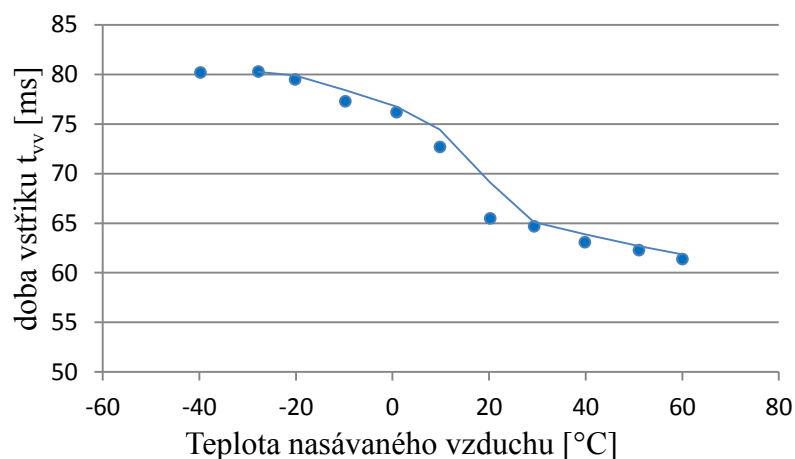
Během měření byly nahrazeny snímače teploty motoru (chladicí kapaliny) a teploty nasávaného vzduchu potenciometry. Teplota motoru byla nastavena na hodnotu 0°C.

teplota nasávaného vzduchu [°C]	teplota motoru [°C]	tlak v sacím potrubí p_{v2} [kPa]	otevření škrticí klapky [%]	dobu vstřiku t_w [ms]	Otáčky n [min ⁻¹]	α [-]
-39,8	0	108,1	5,6	80,2	768	2,46
-27,8	0	101,1	6,2	80,3	285	2,16
-20,2	0	109,8	6,2	79,5	577,5	2,33
-9,8	0	101,1	5,8	77,3	332,2	2,09
0,8	0	101,1	5,7	76,2	339,8	2,04
9,8	0	109,8	5,6	72,7	324,8	2,28
20,2	0	101,1	5,6	65,5	278,8	2,22
29,3	0	109,8	5,6	64,7	311	2,4
39,8	0	101,1	5,6	63,1	277,8	2,16
51	0	109,8	5,8	62,3	314,2	2,32
60	0	109,8	5,7	61,4	329,8	2,29

Tabulka 2 - Měření směšovacího poměru během startování při změně teploty nasávaného vzduchu



Graf 1 - Závislost směšovacího poměru na teplotě nasávaného vzduchu



Graf 2 - Závislost doby vstřiku paliva na teplotě nasávaného vzduchu

Pro výpočet konkrétního směšovacího poměru α jsou použity vztahy z kapitoly 3. Dále je uveden příklad výpočtu.

Pro výpočet hustoty vzduchu ve spalovacím prostoru ρ_{v3} je použit vztah (7) a (5), po dosazení:

$$\rho_{v2} = \frac{108100}{287,1 \cdot 233,35}$$

$$\rho_{v2} = 1,6136 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\rho_{v3} = 1,6136 \cdot 0,95$$

$$\rho_{v3} = 1,5329 \text{ [kg/m}^3\text{]}.$$

Hmotnost vzduchu ve válci během jednoho pracovního cyklu motoru je dána vztahem:

$$m_v = V_V \cdot \rho_{v3} \quad (20)$$

$$m_v = 0,00039775 \cdot 1,5329$$

$$m_v = 0,0006097 \text{ [kg]}.$$

Pro výpočet hmotnosti paliva jsou použity vztahy (9) a (11). Po dosazení:

$$v_{p1} = \sqrt{2 \cdot \frac{445000 - 108100}{740}}$$

$$v_{p1} = 30,1752 \text{ [m/s]}$$

$$Q_{mp} = 0,0000001382 \cdot 30,1752 \cdot 740$$

$$Q_{mp} = 0,003086 \text{ [kg/s]}.$$

Hmotnost paliva ve válci během jednoho pracovního cyklu motoru je dána vztahem:

$$m_p = Q_{mp} \cdot t_{vv} \quad (21)$$

$$m_p = 0,003086 \cdot 0,0802$$

$$m_p = 0,000247 \text{ [kg]}.$$

Podle vztahu (1) je vypočítán směšovací poměr α :

$$\alpha = \frac{0,0006097}{0,000247}$$

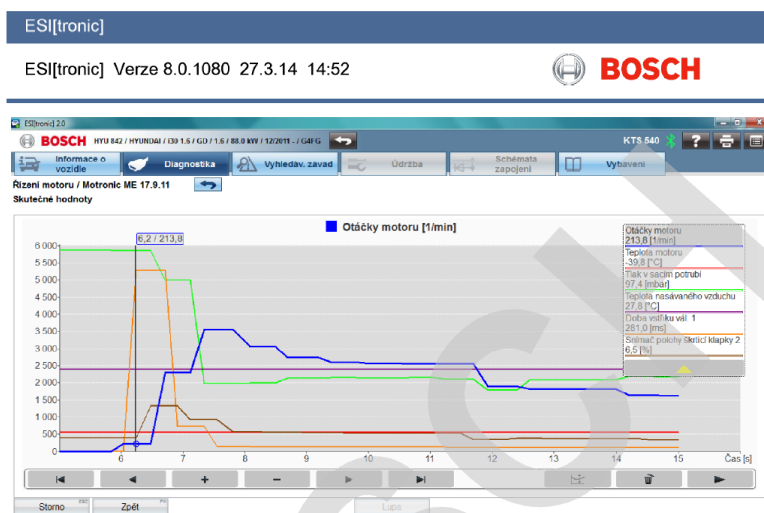
$$\alpha = 2,46[-].$$

Z měření vyplývá, že při zvyšování teploty nasávaného vzduchu, dochází k poklesu hustoty nasávaného vzduchu, a tím pádem dojde ke snížení hmotnosti nasátého vzduchu do spalovacího prostoru během jednoho pracovního cyklu. ŘJ snižuje vstřikovanou dávku paliva, a tím udržuje stejný směšovací poměr α na celém rozsahu teploty nasávaného vzduchu. Směšovací poměr α je dán teplotou chladicí kapaliny.

7.2 Závislost směšovacího poměru na teplotě chladicí kapaliny

Během měření byl nahrazen snímač teploty motoru potenciometrem. Teplota nasávaného vzduchu nebyla ovlivňována. Po opakovaném startu vlivem ohřívání motoru a sacího potrubí, teplota nasávaného vzduchu rostla, ale jak dokazuje předchozí měření, teplota nasávaného vzduchu nemá vliv na směšovací poměr.

Z měření vyplývá, že teplota chladicí kapaliny velmi výrazně ovlivňuje poměry ve složení směsi. Měření přesně odpovídá teoretickému předpokladu v kapitole 5.1. Při klesající teplotě dochází k obohacování směsi až na hranici zápalnosti. Při vzrůstající teplotě zase dávka paliva klesá, a směs se při startování motoru, který je zahřátý na provozní teplotu, ochuzuje na hranici, která téměř odpovídá směsi při chodu motoru, to je stechiometrickému poměru.



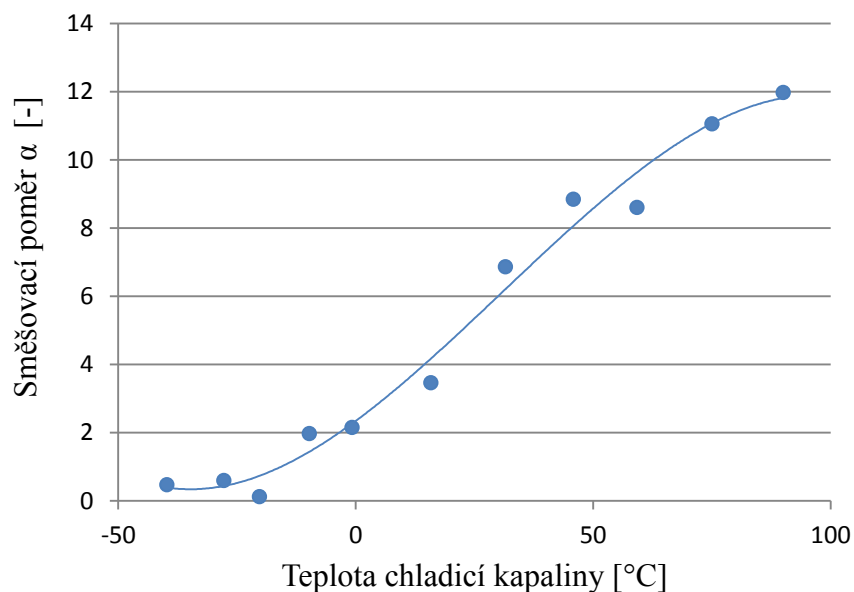
Obr. 14 - Měření závislosti směšovacího poměru na teplotě chladicí kapaliny ESI 2.0

Postup výpočtu pro stanovení směšovacího poměru α je stejný jako v kapitole 7.1. Stejný postup bude i nadále používán pro všechny ostatní měření, pokud bude potřeba stanovit směšovací poměr α a výpočty již nebudou uváděny.

teplota motoru [°C]	teplota nasávaného vzduchu [°C]	tlak v sacím potrubí p_{v2} [kPa]	otevření škrticí klapky [%]	dobu vstřiku t_{vv} [ms]	Otáčky n [min^{-1}]	α [-]
-39,8	27,8	97,4	6,5	281	213,8	0,48
-27,8	27,8	91,9	15,8	210,5	1070,8	0,604
-20,3	27,8	85,9	11,4	80,1	432,2	0,13
-9,8	29,2	93,1	7,5	64,7	639,5	1,98
-0,8	30	94,9	6,5	60,6	307,2	2,16
15,8	33	97,4	6	38,5	178,2	3,47
31,5	34,5	91,4	4,2	18	329	6,87
45,8	42,8	97,9	6,2	14,7	276,5	8,85
59,2	42,8	90,9	4,4	13,9	346	8,61
75	45	89,8	3,3	10,6	335,5	11,06
90	48	90,7	3,3	9,8	322,5	11,98

Tabulka 3 - Měření směšovacího poměru při změně teploty chladicí kapaliny motoru

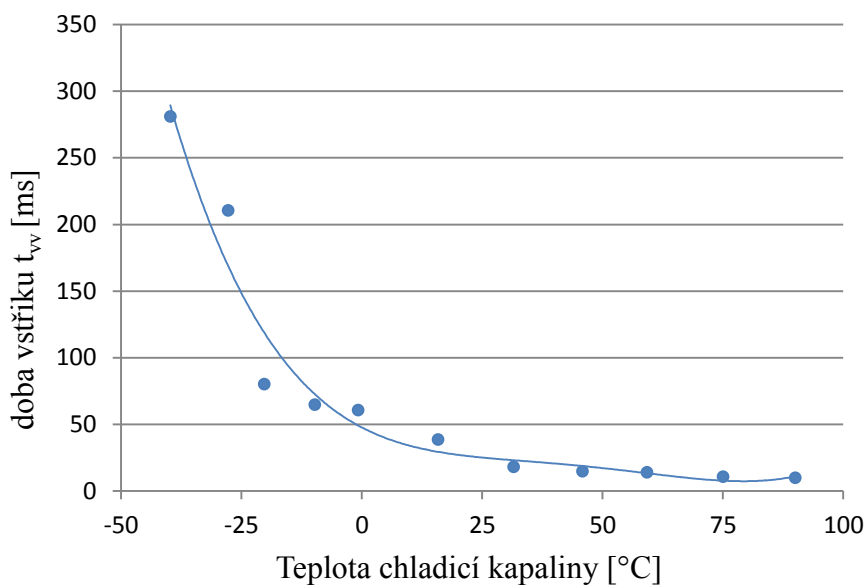
Tabulka 3 obsahuje hodnoty naměřené během startování. Tyto hodnoty popisují charakteristiku řízení směšovacího poměru α . Směšovací poměr α byl vypočítán.



Graf 3 - Závislost směšovacího poměru α na teplotě chladicí kapaliny

Směšovací poměr je při extrémně nízkých teplotách velmi nízký, směs je bohatá. To se projevilo obtížným průběhem startování. To nastává tehdy, když je teplota chladicí kapaliny nastavena na potenciometru, ale skutečná teplota je o několik desítek °C větší.

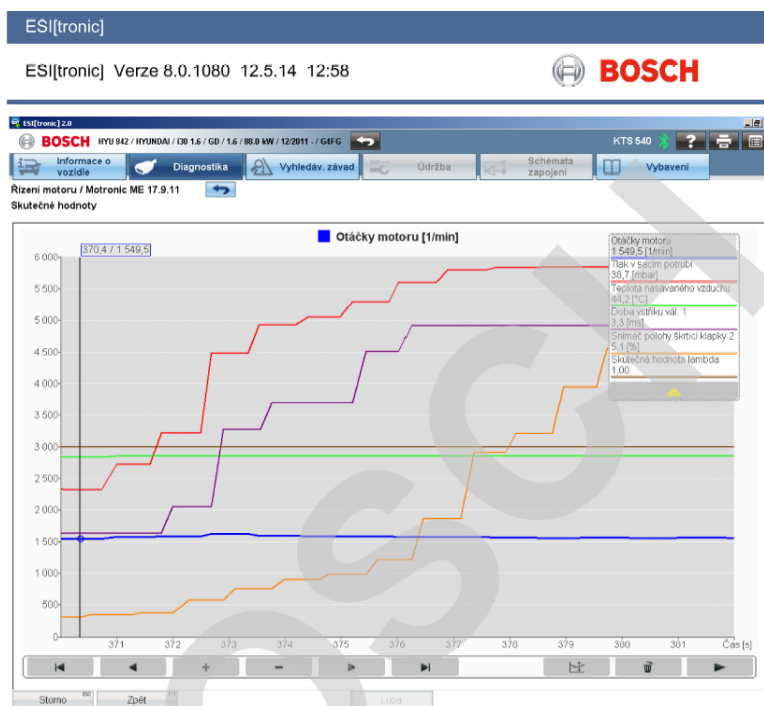
Průběh závislosti doby vstřiku na teplotě chladicí kapaliny odpovídá exponenciálnímu průběhu, což dokládá potřeba velmi obohacené směsi při extrémně nízkých teplotách.



Graf 4 - Závislost doby vstřiku paliva na teplotě chladicí kapaliny

8 Měření kvantitativního řízení

Měření probíhala na vozidle zahřátém na provozní teplotu, přičemž regulace tvorby směsi pracovala v uzavřené smyčce. Měření probíhala na dynamické válcové zkušebně, kde byla nastavena konstantní rychlost 30 km/h, při zařazeném 3. převodovém stupni (simulace jízdy při nastavitelném rychlostním limitu).



Obr. 15 - Měření kvantitativního řízení ESI 2.0

Po dosažení této rychlosti byl stlačován akcelerační pedál, čímž rostl požadavek na točivý moment při konstantní rychlosti a tím pádem při konstantních otáčkách. Postupným otevíráním škrticí klapky bylo zvyšováno množství vzduchu nasávaného do spalovacího prostoru. Viz Tabulka 4.

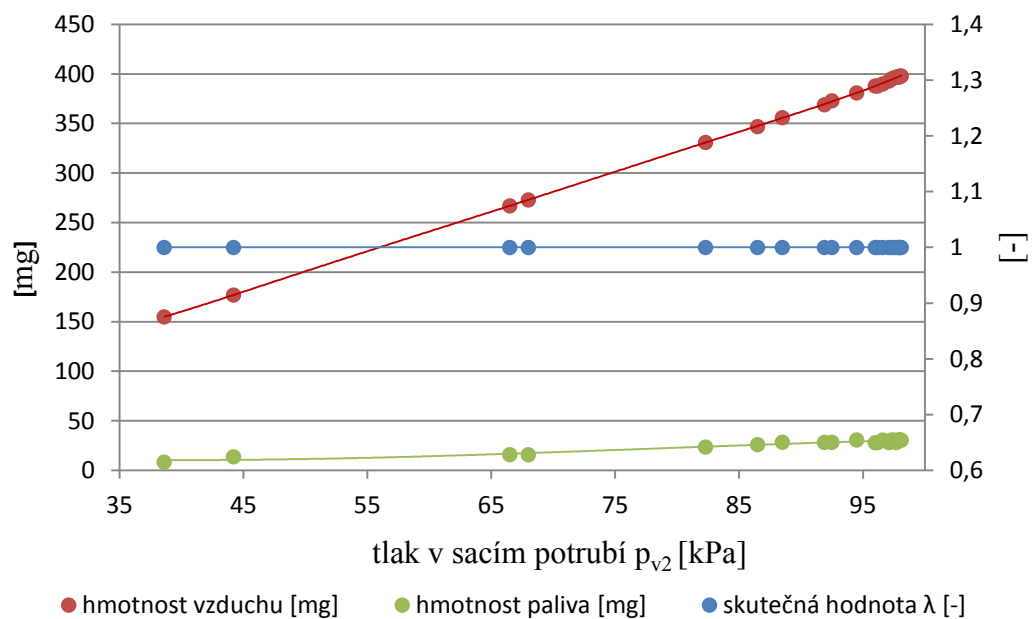
Byly provedeny tři měření při různých rychlostech vozidla a různých otáčkách motoru, které simulovali různé podmínky provozu vozidla. Měření probíhala při konstantních otáčkách s měnícím se zatížením. Všechna měření potvrdila teoretický předpoklad kvantitativního řízení spalovacího motoru. Složení směsi i změna hmotnosti jednotlivých složek směsi potvrdila očekávání. To znamená, že při zvyšujícím se množství nasávaného vzduchu dochází k přímo úměrnému zvyšování množství paliva. V práci jsou uvedeny naměřené hodnoty pouze pro první měření. Pro zbylé měření jsou naměřené hodnoty součástí příloh.

tlak v sacím potrubí p_{v2} [kPa]	otevření škrtecí klapky [%]	teplota nasávaného vzduchu [°C]	doba vstřiku t_v [ms]	Otáčky n [min ⁻¹]	λ [-]	α [-]	hmotnost vzduchu [mg]	hmotnost paliva [mg]
38,6	3,3	54	2,5	967	1	18,32	155	8,4
44,2	4,5	54	4,1	1115	1	12,88	177	13,8
66,5	8,4	54	4,9	1522	1	16,69	267	16
68	10,6	54	4,9	1537	1	17,1	273	15,9
82,3	13,9	54	7,4	1583	1	13,97	331	23,7
86,5	15,8	54	8,2	1583	1	13,33	347	26,1
88,5	17,3	54	9	1577	1	12,46	356	28,5
91,9	19,8	52,5	9	1563	1	13	369	28,4
92,5	22,2	52,5	9	1573	1	13,16	373	28,4
94,5	24,2	52,5	9,8	1564	1	12,38	381	30,8
96	28,6	52,5	9	1554	1	13,72	388	28,1
96,2	30,6	52,5	9	1571	1	13,75	388	28,2
96,6	33,9	52,5	9,8	1557	1	12,69	390	30,7
97,1	36,4	51,8	9	1556	1	13,93	393	28,2
97,3	38,8	51	9,8	1560	1	12,86	395	30,7
97,5	44,5	51	9,8	1559	1	12,88	396	30,7
97,7	46,9	51	9	1559	1	14,07	397	28,2
97,9	50,7	51	9,8	1556	1	12,95	397	30,7
97,9	53,2	51	9,8	1554	1	12,95	397	30,7
98,1	61	51	9,8	1555	1	12,98	398	30,7
98	65,3	50,2	9,8	1577	1	13	398	30,7

Tabulka 4 - Měření kvantitativního řízení při 30km/h

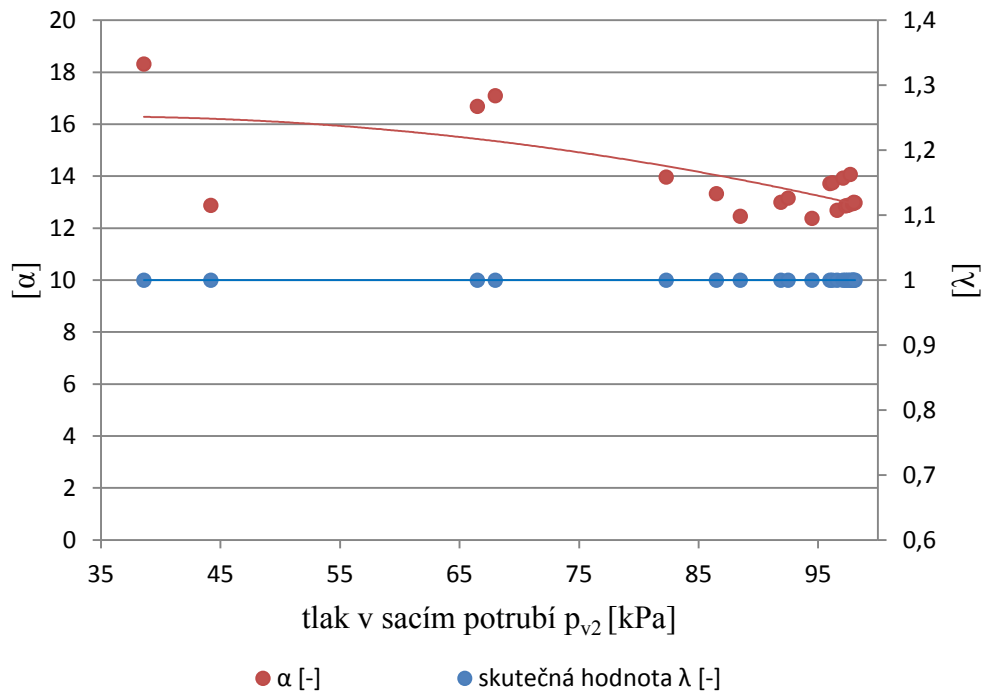
Graf 5 ukazuje závislost hmotnosti vzduchu a paliva nasátého do spalovacího prostoru během jednoho cyklu během zvyšování zátěže motoru. Naměřené skutečné hodnoty λ jsou hodnoty, které počítá ŘJ na základě signálu lambda sondy. Délka doby vstřiku paliva t_v byla měřena pouze na prvním válci, respektive prvním vstřikovacím ventilu.

Hodnoty byly naměřeny pomocí diagnostického zařízení BOSCH KTS. Směšovací poměr α , hmotnost vzduchu a paliva byly spočítány. Postup je uveden u předchozích kapitol.



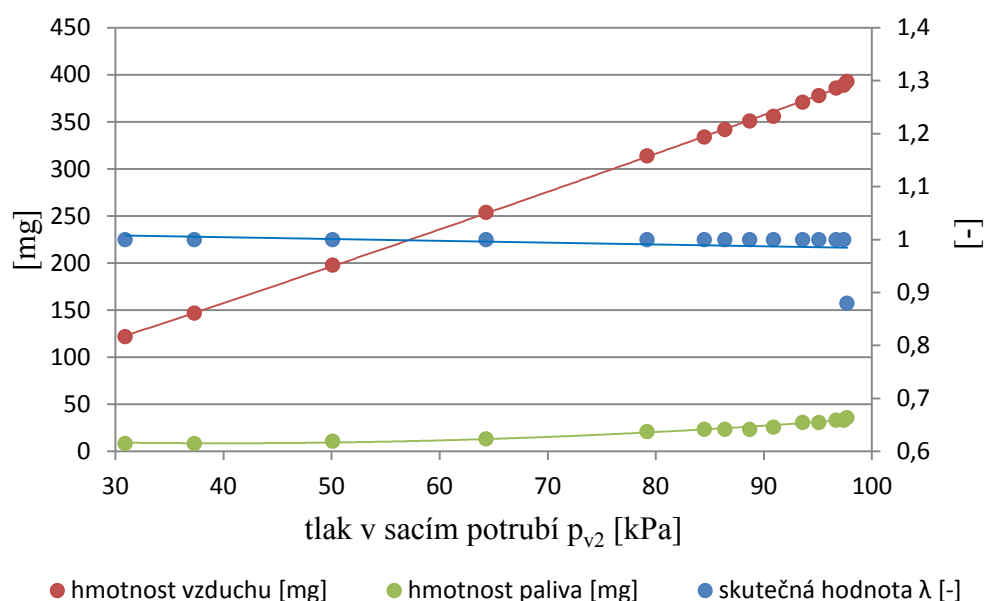
Graf 5 - Kvantitativní řízení při 30 km/h

Graf 6 ukazuje změnu směšovacího poměru při konstantním součiniteli přebytku vzduchu λ , kdy rozdíl mezi těmito průběhy je způsoben měnícími se podmínkami hoření směsi ve spalovacím prostoru.



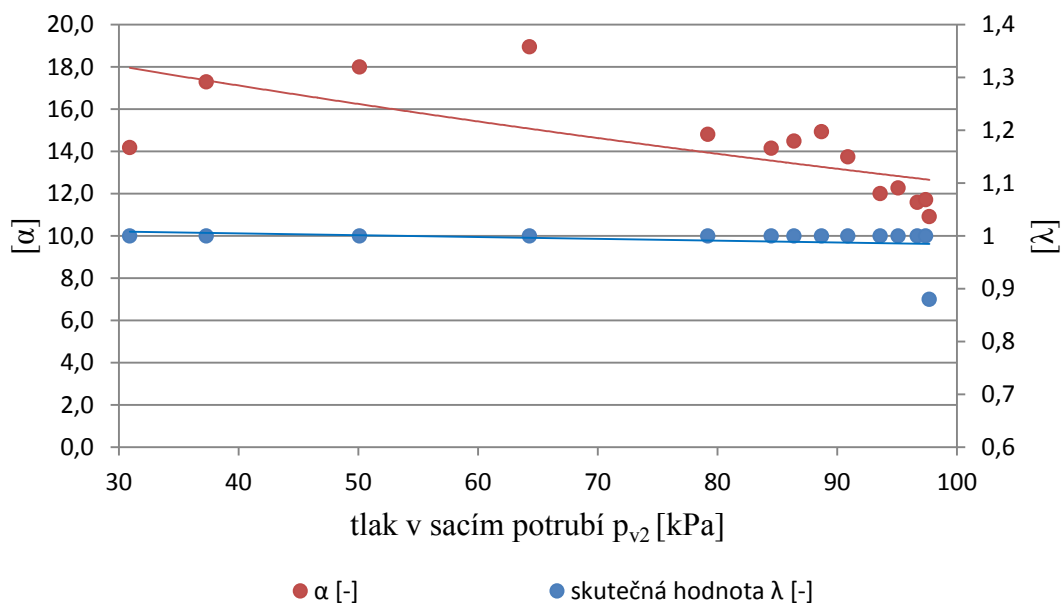
Graf 6 - Závislost směšovacího poměru α a součinitele přebytku vzduchu λ při 30 km/h

Další měření probíhalo při 50 km/h a zařazeném druhém převodovém stupni. Opět bylo při konstantních otáčkách zvyšováno zatížení až na maximální možný točivý moment, který poskytuje měřené vozidlo.



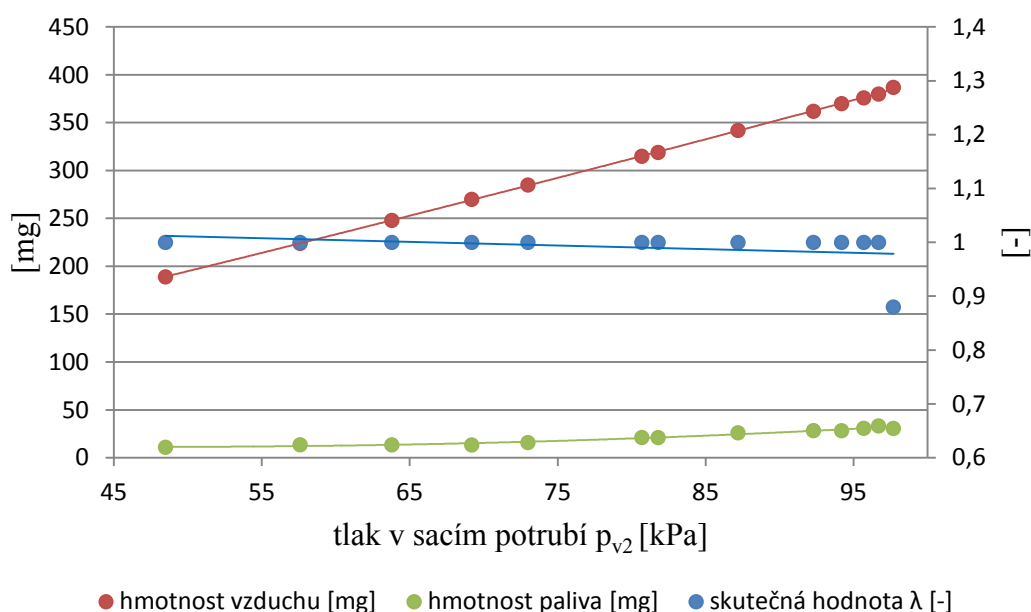
Graf 7 - Kvantitativní řízení při 50 km/h

Graf 7 opět potvrzuje předpoklad kvantitativního řízení. Hodnota součinitele přebytku vzduchu λ při plném zatížení ale neodpovídá ostatním hodnotám, které jsou na konstantní úrovni. To způsobuje ŘJ motoru, která dá příkaz spalovat co nejbohatší směs pro získání maximálního točivého momentu.



Graf 8 - Závislost směšovacího poměru α a součinitele přebytku vzduchu při 50 km/h

Poslední měření kvantitativního řízení probíhalo při 100 km/h, při zařazeném 4. převodovém stupni. Ostatní podmínky byly totožné jako při předchozích měřeních. Cílem tohoto měření bylo vyloučení chyby předchozích měření.





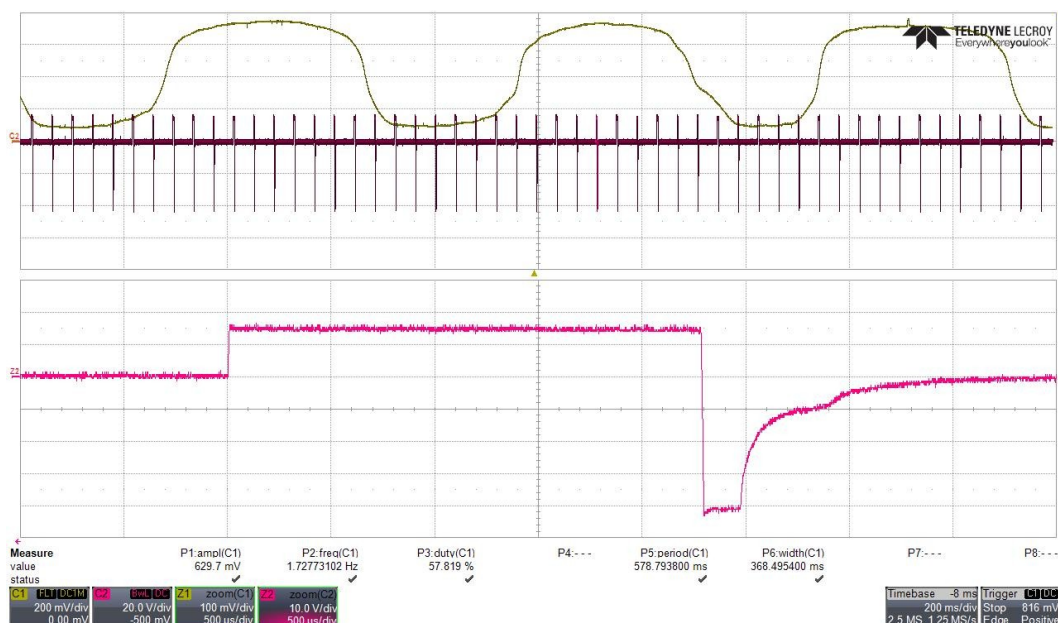
Obr. 16 - Měřené vozidlo umístěné na dynamické válcové zkušebně

9 Měření regulace součinitele přebytku vzduchu λ

Během regulace součinitele přebytku vzduchu λ je nastavená, na základě množství nasávaného vzduchu, délka doby vstřiku paliva t_{vv} . Tato hodnota je dále korigována na základě signálu z lambda sondy. Toto se děje za předpokladu že ŘJ pracuje v režimu uzavřené smyčky. Pro měření napětí lambda sondy byla využita první lambda sonda, která je umístěna před katalyzátorem.

Měření probíhalo s využitím dynamické válcové zkušebny. Během měření byly otáčky a zatížení motoru konstantní. Teoretické předpoklady jsou uvedeny v kapitole 5.4. Byl použit osciloskop LeCroy WaveRunner 604 Zi a diferenční sonda LeCroy ADP 305.

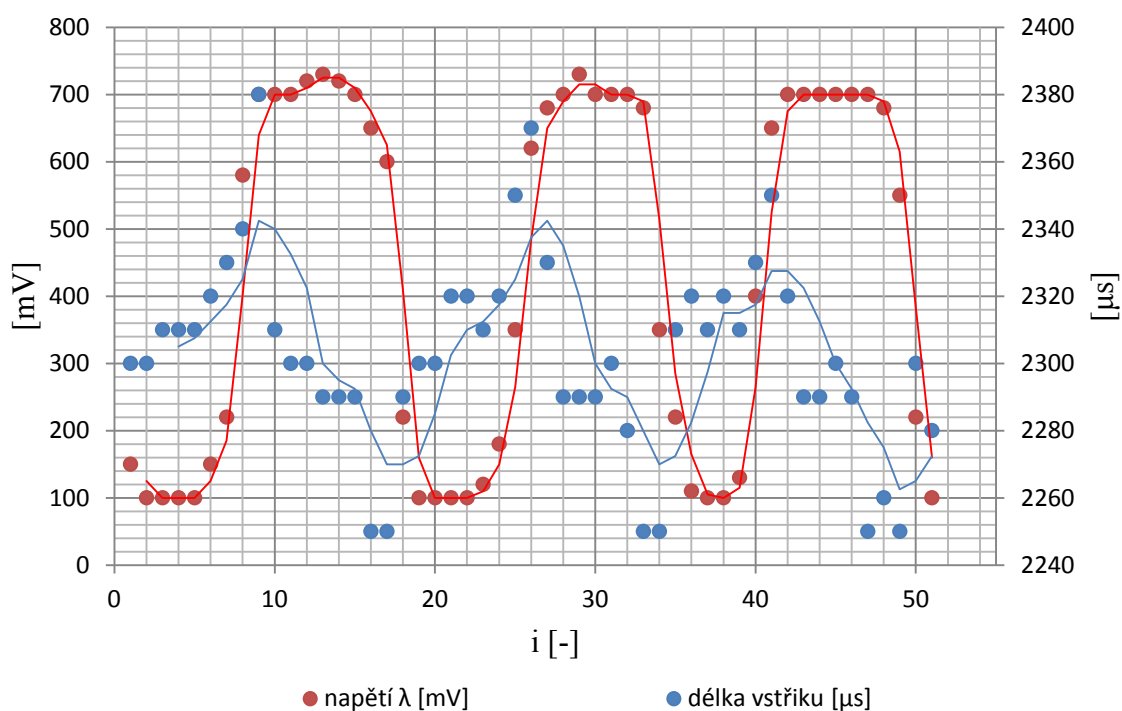
Měření ukazuje změnu vstřikované dávky paliva v závislosti na hodnotě napětí λ (lambda sonda umístěná před katalyzátorem). Pokud je směs vyhodnocena jako bohatá, poté je délka vstřiku paliva postupně zmenšována do té doby, než je směs vyhodnocena jako chudá. Potom následuje prodlužování délky doby vstřiku do doby, než je směs opět vyhodnocena jako bohatá. Tento proces se opakuje stále v uzavřené smyčce řízení spalovacího motoru. Měření probíhala pouze na jednom vstřikovacím ventilu, což poskytuje dostatečnou představu o regulaci součinitele přebytku vzduchu λ .



Obr. 17 - Průběh napětí na lambda sondě a vstřikovacích ventilech při 3000 ot/min

- C1,Z1 – napětí na lambda sondě
- C2, Z2 – napětí na cívkách vstřikovacích ventilů

První měření bylo provedeno bez zatížení při otáčkách 3000 ot/min. Pomocí osciloskopu byla odečtena každá hodnota délky vstřiku paliva t_{vv} za měřený úsek.



Graf 11 - Regulace součinitele přebytku vzduchu λ při 3000 ot/min

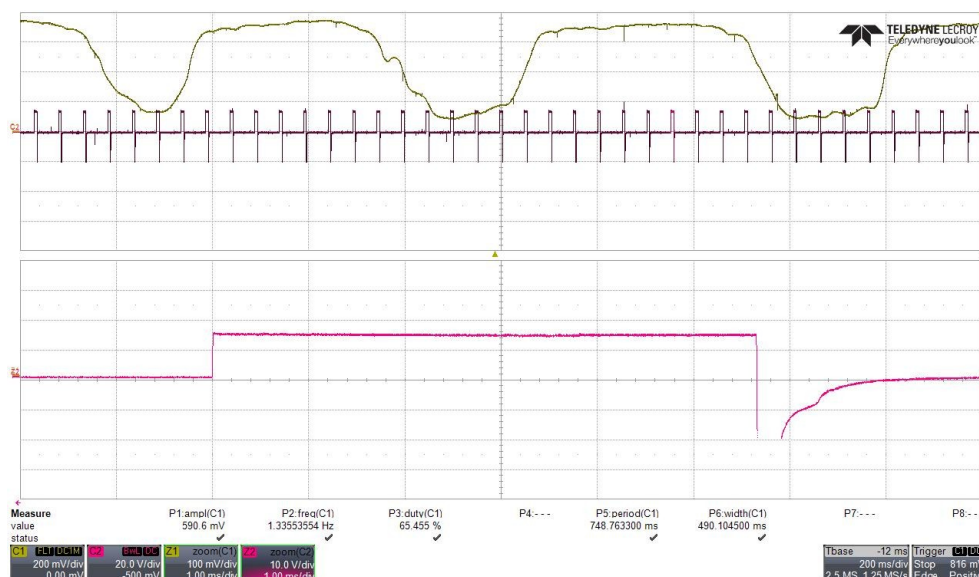
Graf 11 zobrazuje změnu délky doby vstřiku t_{vv} během změny napětí λ sondy z nízkého napětí na vysoké a opačně. Z tohoto jasně vyplývá pokyn ŘJ k obohacování směsi v okamžiku, kdy λ sonda detekuje chudou směs a ochuzování směsi, když λ sonda detekuje směs bohatou.

délka vstřiku t_{vv} [μ s]	Napětí λ [mV]	délka vstřiku t_{vv} [μ s]	napětí λ [mV]
2300	150	2330	680
2300	100	2290	700
2310	100	2290	730
2310	100	2290	700
2310	100	2300	700
2320	150	2280	700
2330	220	2250	680
2340	580	2250	350
2380	700	2310	220
2310	700	2320	110
2300	700	2310	100
2300	720	2320	100
2290	730	2310	130
2290	720	2330	400
2290	700	2350	650
2250	650	2320	700
2250	600	2290	700
2290	220	2290	700
2300	100	2300	700
2300	100	2290	700
2320	100	2250	700
2320	100	2260	680
2310	120	2250	550
2320	180	2300	220
2350	350	2280	100
2370	620	-	-

Tabulka 5 - Měření regulace součinitele přebytku vzduchu na nezatíženém vozidle

Pokud je napětí v rozmezí 0-200 mV, směs je chudá, to znamená přebytek nespáleného vzduchu. Pokud je napětí 600-800 mV, směs je bohatá, to znamená nedostatek vzduchu a přebytek paliva. Při 400 mV je směs v teoretickém, stechiometrickém poměru.

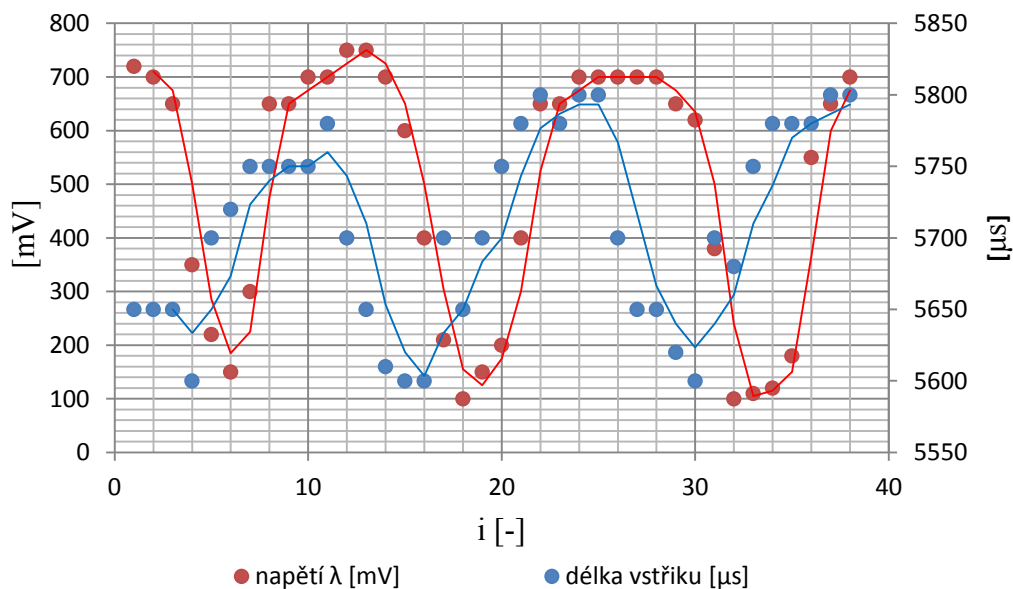
Další měření probíhalo na zatíženém vozidle při 30 km/h. Otáčky motoru byly 2400 ot/min.



Obr. 18 - Průběh napětí na lambda sondě a vstřikovacích ventilech při rychlosti 30km/h

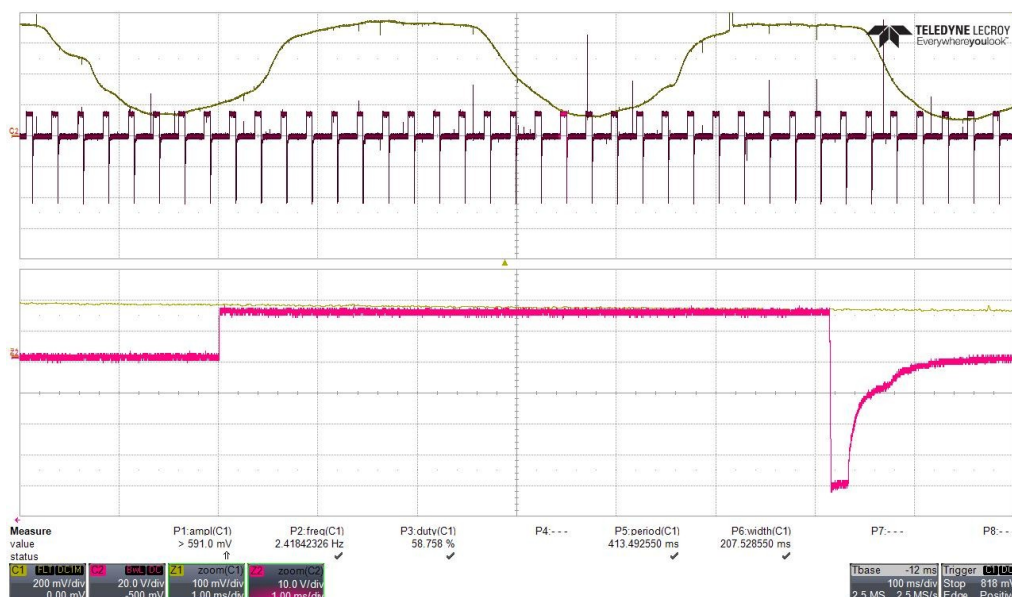
- C1,Z1 – napětí na lambda sondě
- C2, Z2 – napětí na cívkách vstřikovacích ventilů

Tabulka naměřených hodnot je součástí přílohy. Graf 12 ukazuje výsledný průběh změny vstřikovací dávky.



Graf 12 - Regulace součinitele přebytku vzduchu λ při rychlosti 30 km/h

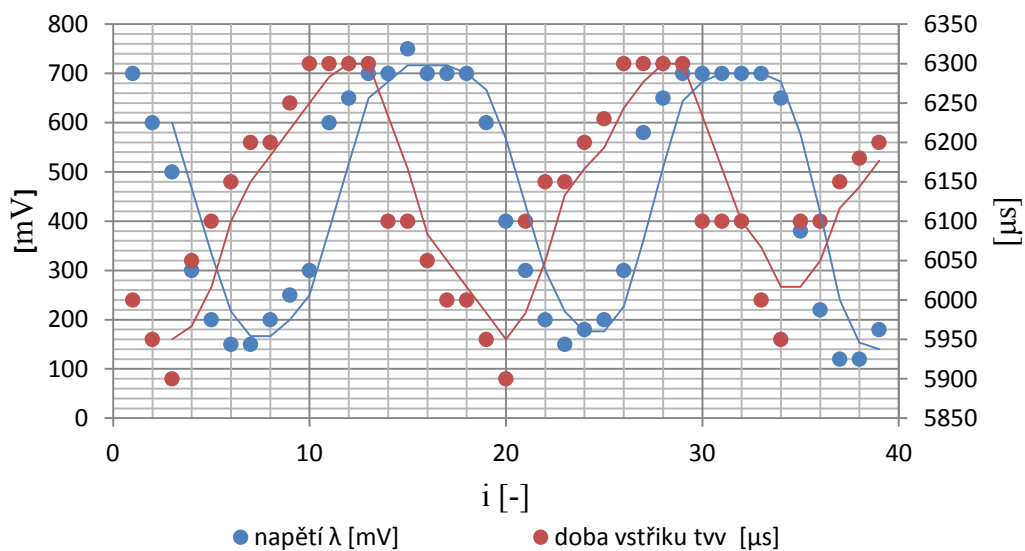
Poslední měření bylo provedeno při rychlosti vozidla 60 km/h. Otáčky motoru byly 4700 ot/min. Měření mělo kontrolní charakter pro ověření správnosti předchozích měření.



Obr. 19 - Průběh napětí na lambda sondě a vstřikovacích ventilech při rychlosti 60km/h

- C1,Z1 – napětí na lambda sondě
- C2, Z2 – napětí na cívkách vstřikovacích ventilů

Znázorňuje naměřené hodnoty na osciloskopu, které byly pro větší přehlednost zobrazeny jako Graf 13. Tabulka naměřených hodnot je součástí přílohy.



Graf 13 - Regulace součinitele přebytku vzduchu λ při rychlosti 60 km/h

10 Závěr

Cílem této práce byla analýza řídicích a regulačních procesů tvorby směsi paliva a vzduchu pro zážehové spalovací motory. V úvodu práce jsou detailně rozebrány způsoby výpočtu množství nasávaného vzduchu a vstřikovaného paliva. Na základě určení rovnic mohlo být realizováno měření, protože diagnostické zařízení neposkytovalo žádané hodnoty o hmotnosti médií. Další částí této kapitoly bylo vytvořit předpoklad pro výpočtové algoritmy ŘJ.

V další části jsou obecně popisovány způsoby řízení spalovacích motorů. Jsou rozebrány rozdíly mezi kvantitativním a kvalitativním řízením. Jsou popsány principy řízení točivého momentu a regulace točivého momentu.

Vedle výše zmíněného jsou popsány technické prostředky řízení, jejich uspořádání ve struktuře motor managementu a jednotlivé vazby mezi nimi. Jsou popsány funkce jednotlivých komponent a jejich úloha v řízení a regulaci tvorby směsi. Zároveň jsou popsány jednotlivé řídicí stavy od startování motoru přes zahřívání po řízení v uzavřené smyčce.

V praktické části práce byly ověřovány teoretické předpoklady uvedené v práci. Část měření se týkala experimentálního zjišťování některých parametrů motoru, aby mohla být provedena navržená měření. Následovalo měření jednotlivých stavů řízení spalovacího motoru. Všechna navržená měření potvrdila teoretické předpoklady. Na základě měření byla vypracována laboratorní úloha.

Během řešení této bakalářské práce byly splněny všechny body zadání.

11 Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] Hofírek, M. *Mechanika tekutin, hydromechanika a základy aerodynamiky*. Nakladatelství FRAGMENT, Havlíčkův Brod 1998.
- [2] Sazima, M. – Kmoníček, V. – Schneller, J. *Technický průvodce 2: Teplo*. SNTL – Nakladatelství technické literatury, a.p. Praha 1989.
- [3] Ribbens, B., W. *Understanding Automotive Electronics*. Sixth Edition, Elsevier Science, USA 2003.
- [4] Denton, T. *Advanced Automotive Fault Diagnosis*. Second Edition, Elsevier Science, USA 2006.
- [5] Jan, Z., - Ždánský, B., *Auutomobily 3 Motory*. 4. Přepřacované vydání. Nakladatelství Avid s.r.o., Brno 2007
- [6] Jan, Z., - Ždánský, B., *Auutomobily 4 Příslušenství*. 5. Přepřacované vydání. Nakladatelství Avid s.r.o., Brno 2007

12 Seznam příloh

- A. Tabulky naměřených hodnot
- B. Typizovaná laboratorní úloha